



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Stimulated raman adiabatic passage in optomechanics

Fedoseev, V.

Citation

Fedoseev, V. (2022, July 7). *Stimulated raman adiabatic passage in optomechanics*. *Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3421649>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/3421649>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Samenvatting

Het werk dat in dit proefschrift wordt gepresenteerd, is de voortzetting van een lange termijn onderzoeksprogramma met als doel het bestuderen van macroscopische kwantumsuperposities. Aan het begin van het gepresenteerde promotieonderzoek werd de optomechanica onderzocht van een zogenaamde trampoline-resonator met een klein spiegelkje, met een diameter van ongeveer de dikte van een haar, in het midden [78, 87]. Hoewel een toestandsoverdracht van een klassieke toestand tussen twee mechanische modi gekoppeld door twee ontstemde lichtvelden werd bereikt [12] bleef de operatie in het kwantumregime ongrijpbaar. Er werden twee belangrijke complicaties gevonden. Lichtabsorptie in de spiegel resulteerde in een aanzienlijke verwarming van het sample: 300 nW resonant laserlicht, nodig voor het controleren en uitlezen van de mechanische beweging, resulteerde in een verhoging van de temperatuur van het sample van 200 mK naar 1 K [78]. We verwachten echter niet dat dit verwarmingseffect de werking in het kwantumregime onmogelijk zal maken. Een belangrijke tekortkoming van dit optomechanische systeem was een beperkte mechanische kwaliteitsfactor van $Q = 0.4 \times 10^6$ bij cryogene temperaturen [87] voor modi met een frequentie $\omega_m \sim 0.5$ MHz. Klemverliezen op de punten waar de trampoline het spiegelkje ontmoet en buigverliezen in het spiegelkje zelf werden geïdentificeerd als de belangrijkste bronnen van mechanische dissipatie. Een dergelijke bescheiden mechanische kwaliteitsfactor leidt ertoe dat de kwantumcoherentietijd $\tau \leq \frac{Q\hbar}{k_B T} = 4 \mu\text{s}$ bij 1 K ongeveer gelijk is aan de mechanische oscillatieperiode van het sample. Coherente optomechanische manipulatie zou multifoton optomechanische koppeling van $g \gtrsim 1$ MHz vereisen. De methoden voor high-fidelity toestandsoverdracht tussen mechanische modi [12, 75] vereisen het zijband-opgeloste regime $\kappa \ll \omega_m \sim 1$ MHz en zwakke optomechanische koppeling $g \ll \kappa$. Deze vereisten kunnen niet gerealiseerd worden voor de trampoline-spiegel-samples en alternatieve samples zijn noodzakelijk.

De tweede complicatie was het handhaven van de optische uitlijning tijdens het afkoelen van het sample. De cryogene opstelling voor de trampoline-spiegel-

samples was zeer asymmetrisch en had zeven lage-temperatuur actuatoren om de veranderingen in de uitlijning tengevolge van het afkoelen te compenseren. Bij lage temperaturen had de opstelling een bescheiden moduskoppeling van 0,33 en het was een grote uitdaging om de laserfrequentie te vergrendelen op een optische trilholtte frequentie, zelfs na het dempen van mechanische vibraties met behulp van een mechanisch laagdoorlaatfilter van de vierde orde geïnstalleerd in de cryostaat [79].

Om deze beperkingen aan te pakken, zijn we begonnen met het bouwen van een axisymmetrische membraan-in-het-midden opstelling bij kamertemperatuur, zoals beschreven in hoofdstuk 2. Met behulp van deze opstelling en een commercieel verkrijgbaar SiN-membraan bereikten we een sterk samengedrukte ("squeezed") thermische toestand van een mechanische modus. Eén van de kwadraturen van het optische veld in de resonator werd gekoeld door de parametrische aansturing. Dit is een bekende techniek met een limiet van 3 dB samendrukken als gevolg van divergentie van de andere kwadratuur. Onze bijdrage was het toepassen van een viskeuze dempingskracht op deze divergerende kwadratuur via elektrostatische interactie, waardoor een samendrukking van 8,5 dB kon worden bereikt.

Bij kamertemperatuur bereiken de kwaliteitsfactoren van de commercieel verkrijgbare SiN-membranen 50×10^6 [88] wanneer speciale zorg wordt besteed aan het correct vastmaken van deze samples in een houder. In [88] werd vermeld dat de belangrijkste bron van dissipatie de koppeling van mechanische modi van het membraan met modi in het substraat dat het membraan vasthoudt is. Om deze verliezen samen met de buigverliezen van het membraan op het grensvlak tussen het membraan en het substraat te vermijden, hebben we ervoor gekozen om de mechanische modus ver weg van de membraan-substraatgrens te lokaliseren door een defect te creëren in het fononische kristal dat op het membraan is gevormd [7]. We observeerden kwaliteitsfactoren van wel 40×10^6 voor een 1,3 MHz-modus bij kamertemperatuur, wat ons in staat stelde om optomechanische gestimuleerde Raman Adiabatic Passage (STIRAP) aan te tonen tussen twee mechanische modi [75], zoals beschreven in hoofdstuk 3.

In Hoofdstuk 4 onderzoeken we de mogelijkheid om een enkele fonon mechanische Fock-toestand te creëren en over te dragen tussen twee hoge-Q-modi met STIRAP bij cryogene temperaturen. We concluderen dat dit inderdaad haalbaar moet zijn zolang de STIRAP-pulsen het membraan niet tot boven 1 K zullen verwarmen. De voorbereiding en uitlezing van de toestand vereist het uitfilteren van de aandrijf-laser-pulsen en high-fidelity detectie van de Stokes en anti-Stokes enkele fotonen. We hebben ook de mogelijkheid onderzocht om verstrengelde mechanische toestanden te creëren en te detecteren via fractionele STIRAP.

De optische trilholtte die in de experimenten van Hoofdstuk 2 en 3 is gebruikt, is bijna concentrisch, wat de optische uitlijning erg gevoelig maakt voor laterale verschuivingen van de spiegels die de trilholtte vormen. Om de optische modus redelijk parallel aan de mechanische as te verkrijgen, moeten de trilholttespiegels met een laterale precisie van $\sim 100 \mu\text{m}$ worden gepositioneerd. We ontdekten dat het mogelijk was om door een van de trilholttespiegels handmatig zijdelings te verschuiven, de vereiste relatieve positie van de twee spiegels te bereiken. Deze observatie inspireerde het ontwerp van de cryogene trilholtte waarbij de spiegels zijdelings worden verschoven met precisieschroeven om de optische modus evenwijdig aan de

mechanische symmetrie-as te verkrijgen. Bovendien gebruikten we in plaats van een asymmetrisch ontwerp van de periscoop voor koppeling met een single-mode glasvezel hetzelfde idee van laterale verschuiving van de mode-matching lenzen in plaats van optische elementen te kantelen. Door de hele opstelling axisymmetrisch te houden en geheel uit Invar te maken, bleek dat de trilholtte redelijk goed uitgelijnd bleef wanneer die gekoeld werd tot cryogene temperaturen. Tijdens één van de afkoelingen zagen we een monotone afname van de optische koppeling bij afname van de temperatuur. Tijdens het opwarmen van de cryostaat werd de opstelling ~ 5 graden Celsius boven de kamertemperatuur verwarmd en de koppeling ging tot onze verbazing boven de kamertemperatuur koppeling. We realiseerden ons dat de optische uitlijning suboptimaal was en dat de trilholtte vooraf kan worden uitgelijnd op een zodanige manier om de veranderende uitlijning tijdens het afkoelen te compenseren. Dat werkte - in de daaropvolgende afkoeling nam de optische koppeling tussen de glasvezel en de trilholtte toe van 0,8 bij kamertemperatuur tot 0,96 bij 130 K en stabiliseerde zich vervolgens op 0,93 bij 20 mK nadat de voorcompensatie was ingevoerd. De cryogene trilholtte zorgt voor een hoge verzamefficiëntie van Stokes- en anti-Stokes-fotonen en heeft een uiterst stabiel ontwerp. Bij het plaatsen van een membraan in de cryogene trilholtte zagen we geen afname van de externe koppeling met de lijnbreedteverhouding $\kappa_{\text{ext}}/\kappa$. Door de hoge stabiliteit kon een laserbundel gemakkelijk aan het optomechanische systeem vergrendeld worden ("laser locking") wanneer de opstelling bij mK-temperaturen was, waardoor we de mechanische "ringdown" van één van de defectmodi konden meten die overeenkomt met $Q = 200 \times 10^6$. De cryogene trilholtte wordt besproken in hoofdstuk 5.

Naast mechanische modi van hoge kwaliteit en optomechanische kwanta (fononen) bij lage temperatuur vereist STIRAP een optisch filter om de pomp-laser-pulsen uit te filteren terwijl de optomechanisch verstrooide fotonen naar een enkele fotondetector worden gestuurd. In Hoofdstuk 6 bespreken we een implementatie van zo'n filter met de ontwerptransmissiviteit van 0,85 op resonantie en verzwakking van het ongewenste licht $> 10^{14}$ ontstemd met 1 MHz van de filterresonantie. Het filter is aangepast van [66], het bestaat uit vier opeenvolgende optische trilholttes met smalle lijnbreedte die op resonantie worden gehouden door feedbacklussen die worden bestuurd door microprocessors. We gaan verder met het evalueren van de prestaties van supergeleidende nanodraad enkele-fotondetectoren die bedoeld zijn om de optomechanisch verstrooide fotonen te registreren. De eis van de quantum STIRAP is een algehele detectie-efficiëntie van $\gtrsim 0.05$ en een donkere telsnelheid ("dark counts") van lager dan 10 Hz. Onze detectoren hebben een systeemdetectie-efficiëntie van $> 0,9$ en een donkere telsnelheid van $\sim 0,01$ Hz.

Het is nog een open vraag hoeveel het membraan zal worden verwarmd door de STIRAP-pulsen, wat ook de kwaliteitsfactor kan beïnvloeden. In hoofdstuk 7 pakken we dit probleem aan door een thermometrietechniek voor te stellen die gebaseerd is op het meten van de anti-Stokes-verstrooiingssnelheid $\Gamma_{\text{AS}} = \frac{k_B T}{Q\hbar}$ geproduceerd door een laserbundel afgesteld in frequentie op een mechanische zijband van een trilholtte modus. Met deze methode kan de stijging van de membraantemperatuur worden geschat wanneer de STIRAP-stuurpulsen worden ingeschakeld. In de veronderstelling dat het membraan niet wordt verwarmd door het laserveld in de trilholtte, verandert Γ_{AS} niet wanneer het aantal fotonen in de trilholtte wordt gevarieerd van

$\sim 10^3$ wanneer de verwarming hoogstwaarschijnlijk verwaarloosbaar is tot $\sim 10^7$ vereist om STIRAP te besturen. Uit de toename van de gemeten Γ_{AS} met een toename van de intensiteit van de koelende lichtvelden zal de proportionele toename van de temperatuur van het membraan kunnen worden berekend.

Op het moment van schrijven van het proefschrift wordt de volledige opstelling voor optomechanische kwantumexperimenten afgerond: de cryogene trilholtte, hoogwaardige membranen en enkele fotodetectoren zijn op hun plaats, terwijl de optische filteropstelling samen met de daarbij behorende vacuümkamer wordt geïnstalleerd. Ook de aansturing van het optische filter vraagt extra aandacht.

We zijn van plan om membraanverwarming te onderzoeken, en hiervoor wordt door onze elektronische afdeling een "shot-noise-limited" gebalanceerde detector geproduceerd. De volgende stappen nadat de filteropstelling klaar is, zijn de demonstratie van een enkele fonontoestand via detectie van een Stokes-foton en de demonstratie van STIRAP van een niet-klassieke mechanische toestand tussen twee modi van een membraan.